

И. И. Чумачков^{*}, А. А. Досымбетова, В. Е. Кормышев, Д. А. Романов

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

^{*} putlife@mail.ru,

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук В. Е. Громов

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ НАПЛАВОК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

В работе произведена наплавка износостойких покрытий на сталь Hardox 450 и их последующая электронно-пучковая обработка. Изучены износостойкость, микро- и нанотвердости покрытий, а также их структура и фазовый состав.

Ключевые слова: наплавка, микротвердость, электронный пучок, обработка, сталь.

I. I. Chumachkov, A. A. Dosymbetova, V. E. Kormyshev, D. A. Romanov

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT SURFACING, MODIFIED E-BEAM PROCESSING

In the work produced by the surfacing of wear-resistant coatings for steel Hardox 450 and subsequent electron-beam treatment. Studied wear resistance, micro and anotherdate coatings. And also their structure and phase composition.

Keywords: welding, microhardness, electron beam, processing, steel.

Проблема повышения эксплуатационной стойкости деталей машин и механизмов решается за счет целенаправленного изменения свойств их рабочих поверхностей за счет различных видов концентрированных потоков энергии. Получение покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими повышение надежности и долговечности работы изделий в экстремальных условиях, характеризующихся повышенными механическими нагрузками, износом, коррозией, наличием агрессивных сред и циклическим воздействием, является фундаментальной задачей физики конденсированного состояния.

Целью настоящей работы явился сравнительный анализ структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, трибологических и механических свойств покрытий, наплавленных на износостойкую сталь Hardox 450 электродуговым методом порошковыми (Fe–C–Nb–Cr–W) и (Fe–C–Ni–B) проволоками различного химического состава и модифицированных электронно-пучковой обработкой и установление природы упрочнения поверхности комбинированным методом.

Формирование наплавленного слоя на поверхность стали осуществляли в среде защитного газа состава 98%Ar,2%CO₂, сварочный ток находился в пределах 250–300 А, а напряжение на дуге – 30–35 В для первых двух проволок и 350–400 А и U = 40–45В для третьей проволоки. Наплавку порошковыми проволоками проводили двумя способами: путем формирования наплавочного слоя в одном направлении и путем проведения перекрестной наплавки. В качестве дополнительной упрочняющей поверхностной обработки использована обработка интенсивными электронными пучками для высокоскоростного плавления поверхностного наплавленного слоя.

Результаты, полученные методами дифракционной электронной микроскопии тонких фольг, позволяют утверждать, что сталь Хардокс 450 в исходном состоянии (состоянии перед созданием наплавленного электродуговым методом слоя) имеет структуру, сформировавшуюся при низкотемпературном отпуске мартенсита пакетной морфологии. В объеме кристаллов мартенсита и на их границах, границах пакетов и зерен присутствуют наноразмерные частицы карбидной фазы (карбид железа, цементит)

В результате формирования наплавки образуется высокопрочный поверхностный слой толщиной не менее 6 мм, средняя величина микротвердости которого составляет 10,2 ГПа, что в 1,7 раза превышает микротвердость основы. Увеличение количества наплавленных слоев от одного до двух приводит лишь к некоторому увеличению (с 6,5 мм до 7,5 мм) толщины упрочненного слоя; величина твердости упрочненного слоя практически не зависит от количества наплавленного металла. Высокие прочностные свойства наплавленного слоя обусловлены, с одной стороны, формированием закалочной структуры (мартенсит), а с другой, образованием включений второй фазы. Основной упрочняющей фазой наплавленного слоя, не зависимо от количества проходов наплавочной проволоки, являются частицы карбида ниобия. Размеры включений карбида ниобия изменяются в пределах от 0,2 мкм до 1,5 мкм

В структуре переходного слоя (слой, разделяющий объем стали и наплавку) выявлено образование частиц специальных карбидов, а именно, карбидов хрома (Cr₃C₂ и Cr₇C₃), карбида сложного состава типа M₂₃C₆ ((Fe, Cr)₂₃C₆) и, весьма редко, карбида вольфрама состава WC. Частицы специальных карбидов располагаются в объеме и на границах кристаллов мартенсита, имеют округлую форму; размеры частиц изменяются в пределах от 30 нм до 50 нм

Для слоя, наплавленного проволокой 2 исследования механических и трибологических свойств наплавленного слоя показали, что микротвердость при одном проходе изменяется в пределах 10,5...12,5 ГПа и ≈ 15 ГПа при двойном проходе, что в 2 и 3 раза, соответственно, выше микротвердости основы. При одном проходе износостойкость в 2 раза выше, а коэффициент

трения в $\approx 2,2$ раза ниже соответствующих величин стали в исходном состоянии многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, обусловленной закалочным эффектом (формирование ультрамелкой мартенситной структуры α -фазы) и наличие включений боридов железа состава Fe_2B и FeB субмикронных размеров, формирующих эвтектику пластинчатого типа

Повышенные механические и трибологические свойства наплавленного слоя 3 обусловлены формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой связано с формированием мартенситной структуры α -матрицы и наличием высокой (более 50 %) объемной доли включений карбидной фазы на основе железа, хрома, вольфрама и ниобия (Me_{23}C_6 , Fe_3C , NbC , Nb_2C , Nb_6C_5 , V_8C_7 и др.).

Таблица

Результаты трибологических испытаний наплавки проволокой 3

Материал	$*V, 10^{-6}, \text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$	$\langle\mu\rangle$
Сталь Хардокс 450	95,1	0,259
Наплавка одинарная	0,69	0,104
Наплавка двойная	0,69	0,132

V – скорость износа, параметр, характеризующий степень изнашивания материала при испытаниях; $\langle\mu\rangle$ – среднее значение коэффициента трения.

Облучение наплавленного слоя 1 высокоинтенсивным импульсным электронным пучком приводит к модифицированию поверхностного объема толщиной до 30 мкм. Структура модифицированного ЭПО слоя имеет элементы травления в 2 раза меньше, чем не модифицированного.

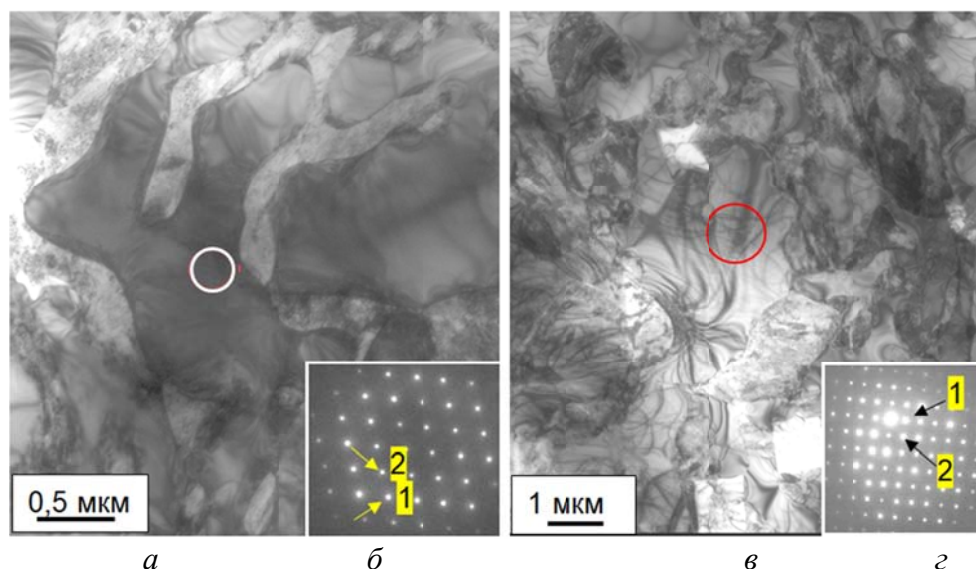


Рис. ПЭМ изображение структуры поверхности наплавленного проволокой 2 слоя после ЭПО; a, v – светлые поля, b, z – микроэлектронogramмы, полученные с областей, выделенных на a и v окружностями. Стрелками на b указаны рефлексы фазы FeB : 1 – $[011]$; 2 – $[111]$; на z указаны рефлексы фазы V_4C : 1 – $[012]$; 2 – $[110]$

Таким образом, облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком сопровождается существенным уменьшением размеров зерен (с 5–7 мкм в наплавленном слое до 1,5–2 мкм в облученном) и частиц карбидной фазы, а также изменением морфологии частиц карбидной фазы облученного слоя. В совокупности это приводит к существенному снижению коэффициента трения наплавленного слоя, износостойкость которого более чем в 70 раз превышает износостойкость стали Хардокс 450

Сформированная облучением интенсивным импульсным электронным пучком структура наплавки характеризуется сравнительно высоким значением износостойкости, более чем в 20 раз превышающим износостойкость стали и более чем в 11 раз износостойкость наплавленного слоя, не модифицированного электронным пучком, и сравнительно низким (в $\approx 3,5$ раза ниже коэффициента трения стали) значением коэффициента трения

Слой наплавленного металла, подвергнутый облучению интенсивным импульсным электронным пучком, находится в упруго-напряженном состоянии, о чем свидетельствуют многочисленные изгибные экстинкционные контуры, присутствующие в выделениях карбидной фазы

По результатам исследований сделаны следующие основные выводы.

1. Электродуговая наплавка (Fe–C–Cr–Nb–W) проволокой формирует независимо от количества проходов градиентную структуру, заключающуюся в закономерном изменении микротвердости, фазового состава и дефектной субструктуры модифицированного слоя материала. Микротвердость наплавленного слоя \sim в 2 раза превышает микротвердость металла основы; износостойкость наплавленного металла превышает износостойкость стали Хардокс 450 \approx в 140 раз, при снижении коэффициента трения \approx в 2–2,5 раза.

2. Повышенные физико-механические свойства наплавленного слоя обусловлены формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, упрочнение которой связано с наличием в мартенсите α -матрицы высокой объёмной доли ($\approx 0,6$) включений карбидной фазы на основе железа, хрома, вольфрама и ниобия.

3. Наплавка, созданная Fe–C–Ni–B проволокой, формирует высокопрочный слой толщиной ≈ 7 мм с микротвердостью 10,5–12,5 ГПа при одном проходе и толщиной 10 мм с микротвердостью ≈ 15 ГПа при двойном, что в 2 и 3 раза, соответственно, выше микротвердости металла основы. Износостойкость наплавленного слоя \approx в 2 раза выше износостойкости исходной стали, а коэффициент трения в 2,2 раза ниже.

4. При наплавке за один проход (Fe–C–Ni–B) проволокой формируется эвтектика пластинчатого типа, содержащая субмикронные бориды состава Fe_2B , а при двойном наплавленном слое – FeB. Формирование закаленной ультрамелкой мартенситной структуры α -фазы, высокая скалярная плотность дислокаций ($\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$), наличие большого количества изгибных экстинкционных контуров дают дополнительный вклад в повышенные механические и трибологические свойства.

5. Электронно-пучковая обработка слоя, наплавленного (Fe–C–Cr–Nb–W) проволокой, сопровождается: существенным уменьшением размеров зерен и частиц карбидных фаз, увеличением плотности включений карбидной фазы, изменением их морфологии. В совокупности это приводит к снижению коэффициента трения наплавленного слоя в зависимости от режима наплавки в $2 \div 3$ раза и увеличению износостойкости в $30 \div 70$ раз по отношению к износостойкости стали Хардокс 450.

6. Модифицирование наплавленного (Fe–C–Ni–B) проволокой слоя импульсной электронно-пучковой обработкой выявило увеличение более чем в 20 раз износостойкости и снижение коэффициента трения в 4 раза по отношению к исходной стали. Основными фазами поверхности наплавки является ультрамелкая дисперсная мартенситная структура α -фазы, карбобориды железа $\text{Fe}_3(\text{B}_{0.7}\text{C}_{0.3})$ и борид железа состава FeB_2 . Наплавленный слой состоит из фрагментированной (размеры фрагментов 30–10 нм) закаленной мартенситной структуры α -фазы с высокой скалярной плотностью сетчатой дислокационной субструктуры $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$, высокопрочных боридов железа состава FeB и карбида бора состава B_4C . Такое высокодефектное многофазное состояние определяет высокий комплекс физикомеханических свойств слоя после электронно-пучковой обработки.

7. Результаты работы применяются в учебном процессе и практико-научных исследованиях СибГИУ и внедрены на угольных и горнодобывающих предприятиях для защиты кузовов большегрузных автомобилей и ковшей экскаваторов от абразивного износа

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60032 мол_а_дк и при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1118.2017.2.